

ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭКРАНЫ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СБОРОК

© 2023 г. М. В. Алимов^а, А. А. Жуков^{а, б, *}, С. Д. Якухин^а^а АО «Российские космические системы»,
ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250 Российская Федерация^б Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Волоколамское шос., 4, Москва, 125993 Российская Федерация

*E-mail: zhukov.aa@spacecorp.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Предложен экран, поглощающий электромагнитное излучение, разработана микромашинная технология его изготовления на основе объемной микрообработки монокристаллического кремния, изготовлены экспериментальные образцы и исследованы их характеристики. Показано, что в диапазоне частот измерений 14.7...26.7 ГГц наблюдается плавный рост ослабления, вносимого поглощающим экраном, с ростом частоты до максимального значения 20...23 дБ на частоте около 20 ГГц, а затем плавный спад. Величина ослабления увеличивается по мере роста длины экрана и может достигать любых значений. Изготовленные образцы поглощающего экрана обеспечивают получение значительного ослабления в требуемом частотном диапазоне при малой толщине подложки и могут быть успешно применены в аппаратуре космического назначения с целью обеспечения электромагнитной совместимости.

DOI: 10.31857/S0033849423120021, EDN: HMTRHF

ВВЕДЕНИЕ

Одно из прикладных направлений развития поглощающих экранов – обеспечение электромагнитной совместимости в трактах СВЧ-приборов за счет поглощения электромагнитного излучения в отдельных СВЧ-компонентах. С учетом миниатюризации таких компонентов возникает необходимость исследований и разработок локальных высокоэффективных электромагнитных поглощающих экранов. Чаще всего для общепромышленного назначения поглощающие экраны выполняют на основе изотропных магнитодиэлектриков – наполненных или ненаполненных слоистых композиционных материалов, например, на основе хорошо известного материала – эластичных пластин марки “ХВ” [1]. Конструкция экрана представляет собой пластину, обладающую определенными электрическими и магнитными свойствами, задаваемыми диэлектрической и магнитной проницаемостью, тангенсами углов электрических и магнитных потерь, и имеющего заданную толщину. Одна поверхность пластины при этом металлизирована. Параметры материала и его толщина выбираются из условия максимального поглощения на заданной частоте. Таким образом, имеет место объемное поглощение СВЧ-энергии падающей волны в пластине специально разработанного материала. Реже поглощающие экраны

формируют на основе конструкций, выполненных из метаматериалов [2, 3] или металла [5], электромагнитные свойства которых резко зависят от их геометрического расположения, а эффективность поглощения – от резонансных характеристик, определяемых размерами элементов. Например, в [2] исследован радиопоглощающий метаматериал, располагаемый вблизи сплошной металлической поверхности, и разработана конструкция антенны для приема спутниковых навигационных сигналов с использованием предлагаемого материала в составе поглощающего экрана. Авторы отмечают некоторый технический эффект при конкурентоспособности разработки, позволяющей улучшить массогабаритные характеристики антенн. Известна СВЧ поглощающая структура на основе метаматериала [3], которая включает диэлектрическую подложку, с одной стороны которой сформирована решетка, при этом каждая ячейка решетки включает систему микрополосковых СВЧ-резонаторов, микрополоски которых выполнены из металла с высокой проводимостью – меди. Другая сторона диэлектрической подложки металлизирована. Со стороны микрополосковых резонаторов структура снабжена дополнительным слоем радиопоглощающего материала с малой диэлектрической проницаемостью значительной толщины. Поглощение СВЧ-энергии обеспечивается, глав-

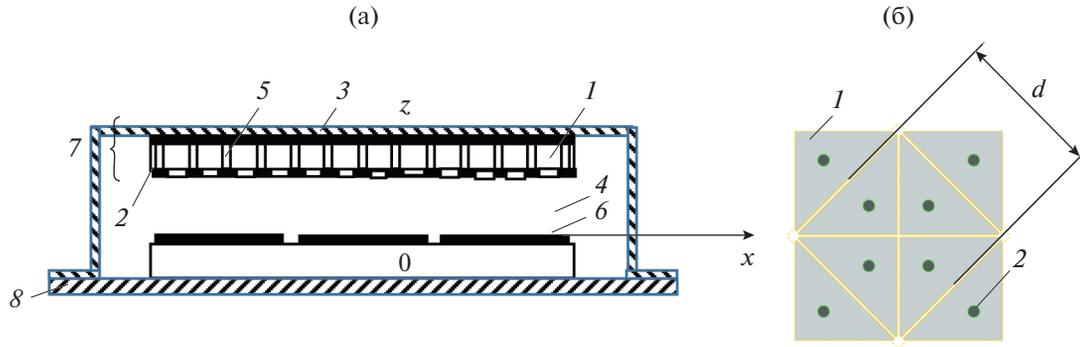


Рис. 1. Поперечное сечение экранируемой СВЧ-микросборки с поглощающим СВЧ-экраном (а): 1 – диэлектрическая пластина, 2 – резистивная пленка, разделенная на ячейки двумерной решетки, 3 – металлический слой, 4 – полость между экраном и микросборкой, 5 – металлизированные отверстия и/или отверстия, поверхность которых покрыта резистивной пленкой, 6 – экранируемая СВЧ-микросборка, 7 – поглощающий экран (смонтировано), 8 – основание крепления микросборки; топологии периода периодической структуры (б): 1 – резистивная пленка, 2 – металлизированное отверстие, d – шаг периодической структуры.

ным образом, за счет объемного поглощения в слое радиопоглощающего материала. Конструкция данного СВЧ поглощающего экрана является сложной из-за необходимости разработки и применения дополнительного слоя специально разработанного радиопоглощающего материала с определенными техническими характеристиками. При этом известные изотропные магнитоэлектрики хорошо изучены, но мало применимы для микроминиатюрных СВЧ-компонентов, а систематических данных по анизотропным поглощающим СВЧ-конструкциям – микроструктурам не обнаружено. В этой связи разработка поглощающих СВЧ экранов, технологии которых совместима с технологией микроэлектроники, представляется крайне актуальной.

Цель работы – рассмотрение поглощающих СВЧ-экранов, обеспечивающих эффективное поглощение электромагнитного излучения в СВЧ-трактах и изготавливаемых по микромашинной технологии.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований служили поглощающие СВЧ-экраны, аналогичные предложенной в планарной СВЧ поглощающей структуре [4]. На рис. 1 представлено поперечное сечение экранируемой СВЧ-микросборки с предложенным поглощающим СВЧ-экраном (а) и рисунок топологии периода периодической структуры (б).

Типовая конструкция поглощающего экрана микрополосковых сборок включает боковые металлические стенки, которые образуют отсек СВЧ-прибора прямоугольного поперечного сечения. Далее рассмотрена именно такая конструкция.

Топология образована резистивной пленкой, разделенной на ячейки тонкими линиями, свободными от пленки. Каждая ячейка гальваниче-

ски связана с противоположной стороной экрана металлизированным отверстием и/или отверстием, поверхность которого покрыта резистивной пленкой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЛОЖЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭКРАНА

Резистивная пленка, разделенная на ячейки, образующие поверхностную решетку, может быть охарактеризована комплексным удельным поверхностным электрическим сопротивлением $\rho = \rho^{\circ} + jx^{\circ}$, где ρ° – действительная часть удельного поверхностного сопротивления, $jx^{\circ} = -j/(\omega C^{\circ})$ – мнимая часть удельного поверхностного сопротивления, C° – удельная емкость решетки. Величина ρ° близка к поверхностному сопротивлению резистивной пленки, тогда как мнимая часть x° , при размерах ячейки много меньше длины волны, определяется удельным емкостным сопротивлением двумерной решетки ячеек и при простой геометрии может быть оценена квазистатическими, а в более сложных случаях – численными методами.

Для поглощающего СВЧ-экрана толщиной $a = 0.4$ мм, с периодом решетки 1.36 мм, выполненного из монокристаллического кремния, удельная емкость решетки слабо зависит от частоты и в диапазоне 16...26 ГГц изменяется практически линейно на 9.2%. Частотная зависимость эффективного поверхностного сопротивления ρ° в том же диапазоне показана на рис. 2. Значение $\rho^{\circ} = 13...15$ Ом/квадрат для резистивной пленки с удельным поверхностным сопротивлением $\rho \approx 10$ Ом/квадрат. Таким образом, ρ° превышает ρ ,

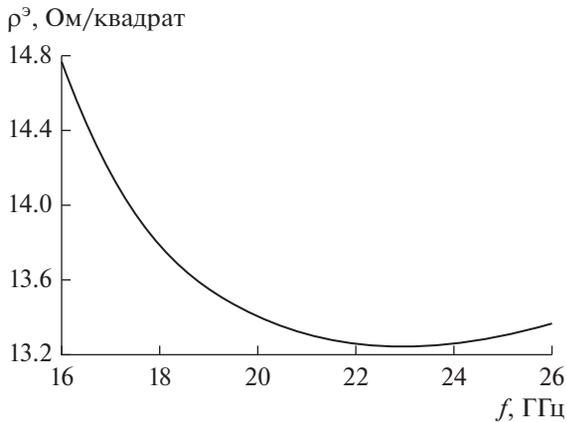


Рис. 2. Частотная зависимость эффективного поверхностного сопротивления ρ^3 решетки.

что связано с перераспределением поверхностных токов. Изменение ρ^3 в рассматриваемом частотном диапазоне составляет 11%.

Металлизированные отверстия, пронизывающие экран, придают структурированной диэлектрической пластине существенно анизотропные свойства, так что внутри пластины электромагнитная волна распространяется нормально к ее поверхности с волновым числом $\sqrt{\epsilon_1}k_0$, где ϵ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины, k_0 — волновое число свободного пространства.

Расчетные характеристики отражения от рассматриваемой структуры при падении на нее плоской волны приведены на рис. 3.

Коэффициент отражения $\Gamma^{E,H}$ зависит от угла падения θ и поляризации падающей волны. Применены обозначения с верхним индексом E , если вектор электрического поля \vec{E} лежит в плоскости падения, и с верхним индексом H , когда вектор магнитного поля \vec{H} лежит в плоскости падения.

Поверхностная удельная емкость выбрана из условия достижения минимального отражения на нужной частоте при заданной толщине пластины. Применение емкостной решетки позволило уменьшить требуемую толщину пластины в 2.6 раза. Значение ρ выбрано из условия получения максимального ослабления при нормальном падении. При этом $\rho^3 = 13.3$ Ом/квadrat. Металлизированные отверстия обеспечили стабилизацию характеристик ослабления при изменении частоты.

Рассмотрим работу поглощающего экрана прямоугольного сечения. Анализ включает решение дисперсионного уравнения экрана, которое может быть найдено с помощью сшивания полей

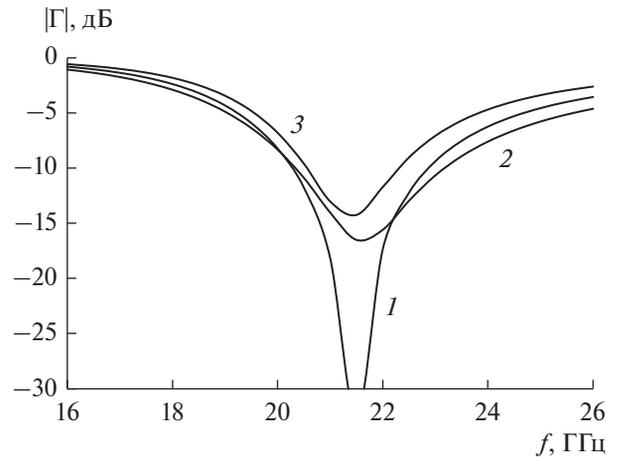


Рис. 3. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения от поглощающей структуры при разных углах падения. $\theta = 0^\circ$, $\epsilon = 11.8$ (кривая 1), $|\Gamma^E|$, $\theta = 45^\circ$ (кривая 2), $|\Gamma^H|$, $\theta = 45^\circ$ (кривая 3).

на границе диэлектрической пластины. Дисперсионное уравнение распадается на два уравнения, одно из которых соответствует LM -волнам с нулевой компонентой магнитного поля H_z , а другое — LE -волнам с нулевой компонентой электрического поля E_z . Ситуация аналогична случаю частично заполненных прямоугольных волноводов [7]. Собственные типы волн ортогональны для колеблющейся мощности [8], что можно проверить непосредственно.

Дисперсионное уравнение для LM -волн, которые в дальнейшем будем называть волнами поперечного волновода [9], имеет вид:

$$\frac{\frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \dot{\beta}_1 \text{tg} \dot{\beta}_1}{1 + i \frac{1}{\dot{\rho}^E} \frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \dot{\beta}_1 \text{tg} \dot{\beta}_1} + \frac{1}{\dot{\epsilon}_2} \dot{\beta}_2 \text{tg} \dot{\beta}_2 g = 0, \quad (1)$$

где $\dot{\beta}_1 = \dot{k}_{z1}a$, $\dot{\beta}_2 = \dot{k}_{z2}a$ — волновые числа поперечного волновода в поглощающей структуре и в полости экрана соответственно, умноженные на толщину диэлектрика a ; $\dot{\rho}^E = (k_0a)\dot{\rho}/W_0$ — параметр уравнения; W_0 — волновое число свободного пространства; $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ — относительные диэлектрические проницаемости, возможно комплексные, диэлектрической пластины и полости экрана соответственно; $g = h/a$ — относительная высота экрана.

Для рассчитанных и изготовленных образцов $\dot{\beta}_2 = \sqrt{\epsilon_1}(k_0a)$, $\dot{\epsilon}_2 = 1$.

Дисперсионное уравнение для LE -волн аналогично (1).

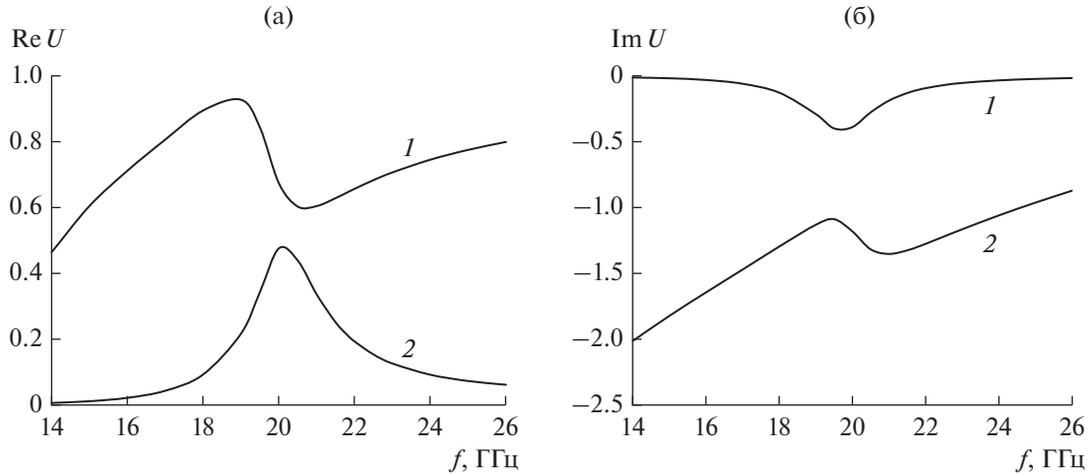


Рис. 4. Действительная (а) и мнимая (б) часть коэффициента замедления \dot{U} для волн E_{10} (кривая 1) и E_{11} (кривая 2) в поглощающем экране сечением 11×5 мм с поглощающей структурой.

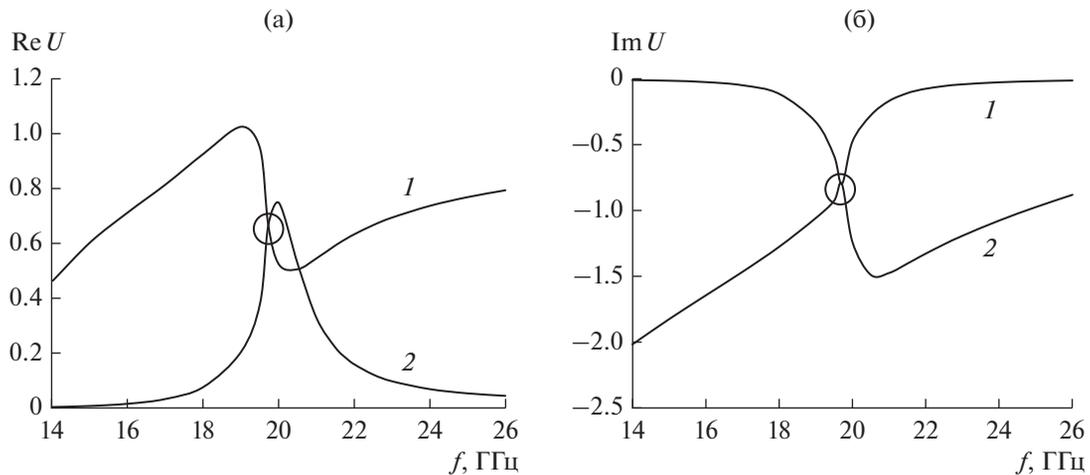


Рис. 5. Действительная (а) и мнимая (б) часть коэффициента замедления \dot{U} при переходе через ТИ (обозначена на рисунке кружком).

Решение (1), пересчитанное в комплексный коэффициент замедления \dot{U} при распространении вдоль оси структуры, для двух низших типов волн E_{10} и E_{11} приведено на рис. 4.

Из рисунка следует, что волна типа E_{10} распространяется с меньшим затуханием, и поэтому именно она будет определять поглощение в экране.

При уменьшении ρ происходит сближение кривых на рис. 4, так что достигается их пересечение в одной частотной точке, которую назовем точкой изменения (ТИ) типа волны. В этой точке типы волн E_{10} и E_{11} имеют совпадающие решения и совпадающую структуру поля. Поэтому в ТИ нарушается ортогональность волн.

Вблизи ТИ обеспечивается близкое к максимальному значение затухания данной структуры, а эффект экранирования близок к наибольшему. На

рис. 5 показано решение для $\rho^2 = 9.668$ Ом/квадрат, содержащее переход через ТИ.

Рассмотрим возбуждение поглощающего экрана прямоугольного сечения элементарным диполем, ориентированным вдоль оси z , плотность тока которого имеет одну составляющую

$$J_z^e(x', y', z') = I^e l \delta(p - q), \quad (2)$$

где $I^e l = dp_z/dt$, p_z – дипольный момент, $\delta(p - q)$ – дельта-функция, p – точка наблюдения, q – точка источника.

Векторный потенциал в этом случае будет иметь единственную составляющую A_z^e .

Примем, что точка источника q расположена в области экранируемой микросборки (поз. 6 на рис. 1) посередине стенки. Тогда ее координаты $x' = 0$, $y' = a_w/2$, $z' = 0$, где a_w – ширина экрана

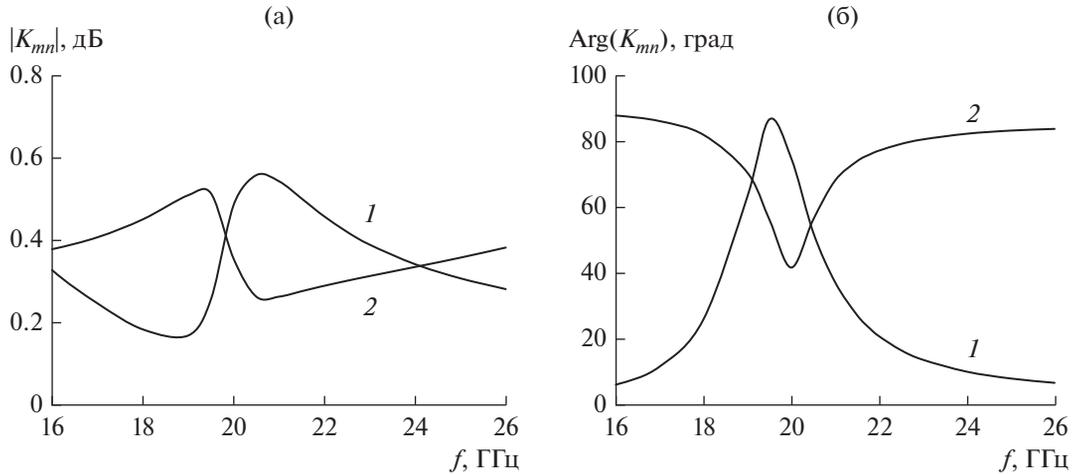


Рис. 6. Частотные зависимости модуля (а) и фазы (б) \dot{K}_{mn} двух нижних волн E -типа для рассматриваемой структуры: E_{10} (кривая 1) и E_{11} (кривая 2).

(принято $a_w = 11$ мм). Точку наблюдения также расположим посередине стенки напротив диэлектрической пластины. Ее координаты $x, y = a_w/2, z = 0$.

Разложение суммарного поля по собственным волнам структуры, при выполнении условия ортогональности, может быть записано в виде

$$A_z^e = i \frac{I^e l}{a_w} \sum_{m=2l+1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \dot{K}_{mn} \exp(-ik_0 \dot{U}_{mn} x), \quad (3)$$

где \dot{K}_{mn} – коэффициенты возбуждения собственных волн структуры.

Каждая собственная волна в суммарном поле характеризуется двумя комплексными параметрами: коэффициентом замедления \dot{U}_{mn} и коэффициентом возбуждения \dot{K}_{mn} и спадает экспоненциально при удалении от источника. Коэффициенты \dot{U}_{mn} определяются из решения дисперсионного уравнения (1). Значения \dot{K}_{mn} могут быть найдены методом интегральных преобразований [10, 11] или методом собственных функций [8].

На рис. 6 приведен пример частотных зависимостей модуля и фазы \dot{K}_{mn} .

Характерно поведение модулей \dot{K}_{mn} в окрестности 20 ГГц, где наблюдается резкое изменение значений $|\dot{K}_{10}|$ и $|\dot{K}_{11}|$.

В ТИ ортогональность волн нарушается, и полевая структура не может быть представлена в форме (3). Случай ТИ исследован методом интегральных преобразований. Вместо слагаемого $\dot{K}_{mn} \exp(-ik_0 \dot{U}_{mn} x)$ из (3) для пары взаимодействующих волн в ТИ получается выражение

$$(a_r + b_r (1 + ik_0 \dot{U}_{mn} x)) \exp(-ik_0 \dot{U}_{mn} x), \quad (4)$$

где a_r, b_r – комплексные коэффициенты.

Таким образом, характер спада поля в ТИ не является чисто экспоненциальным. Возбужденное поле собственной волны в этой точке не может быть охарактеризовано, как в (3), парой комплексных чисел – коэффициентом возбуждения и коэффициентом замедления, но требует для своего описания трех (комплексных) чисел: a_r, b_r, \dot{U}_{mn} .

На рис. 7 приведены расчетные частотные зависимости спада поля на длине 17.5 мм, соответствующей длине изготовленных образцов диэлектрической пластины. Расчет проведен по формуле (3) с учетом выражения (4). Размерный множитель $I^e l/a_w$ опущен.

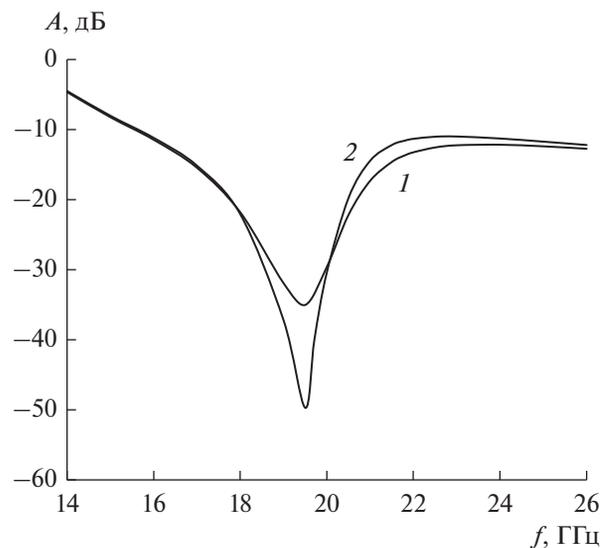


Рис. 7. Частотные зависимости спада поля на длине экрана 17.5 мм. $\rho^3 = 13.3$ Ом/квadrat (кривая 1), $\rho^3 = 9.668$ Ом/квadrat (кривая 2).

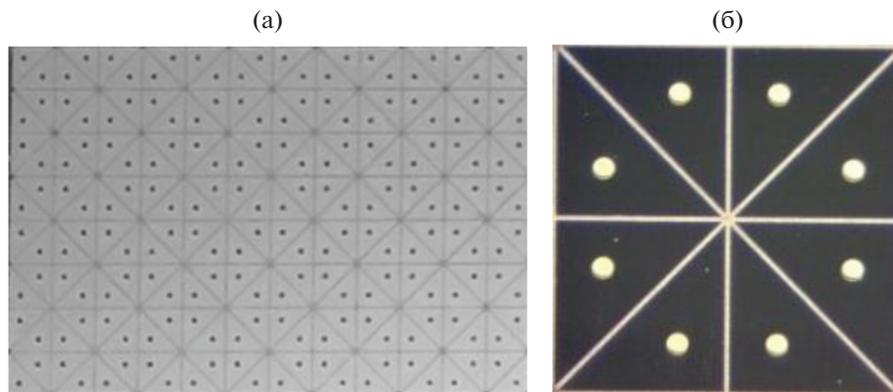


Рис. 8. Общий вид топологии диэлектрической пластины поглощающего СВЧ экрана со стороны резистивной пленки, разделенной на ячейки двумерной решетки (а) и увеличенный фрагмент той же топологии (б).

Кривая для $r^2 = 9.668$ Ом/квadrat проходит через ТИ, чем обеспечивается спадание поля, близкое к максимальному.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

После проведенных расчетов спроектирована топология и изготовлены образцы поглощающих СВЧ-экранов. Поглощающие СВЧ-экраны получали на подложке высокоомного монокристаллического кремния толщиной 400 мкм с применением стандартных технологий микроэлектроники и приемов микромашиной технологии. После формирования меток в Bosch-процессе через маску фоторезиста «сухим» травлением с двух сторон на подложке высокоомного кремния на глубину 5–8 мкм и удаления фоторезиста термическим окислением получали защитный слой SiO₂ и фоторезиста. С обратной стороны подложки фотолитографией формировали маску для травления отверстий и проводили травление отверстий в Bosch-процессе, после чего маску, защитный слой и фоторезист с противоположной стороны подложки удаляли. Диаметр сквозных металлизированных отверстий составил приблизительно 150 мкм. Качество металлизированных отверстий проверяли с применением электронного микроскопа, разрезая подложку по диаметру. Затем магнетронным распылением наносили резистивный слой с удельным поверхностным сопротивлением $\rho = 10$ Ом/квadrat и после фотолитографии получали двумерную решетку с шагом 1.36 мм. Затем магнетронным методом на двух сторонах получали структуру Cr–Cu–Cr, последовательно спреевым нанесением и фотолитографией формировали фоторезистивную маску внутри отверстий и топологический рисунок на двух сторонах травлением Cr–Cu–Cr, после чего в растворителе удаляли Cr, гальванически осаждали Cu и Au, проводили резку на модули и их монтаж.

Ниже представлена последовательность изготовления поглощающих СВЧ-экранов [4]:

1) химическая обработка подложек высокоомного кремния, осуществляемая в жидкостных растворах,

2) формирование меток через маску фоторезиста травлением с двух сторон на подложке высокоомного кремния на глубину 5–8 мкм фотолитографией и в Bosch-процессе,

3) формирование маски для травления отверстий 150 мкм, защитного слоя SiO₂ и фоторезиста с противоположной стороны термическим окислением и фотолитографией,

4) травление сквозных отверстий в Bosch-процессе,

5) удаление маски и защитного слоя из SiO₂ и фоторезиста в жидкостных растворах и в растворителе,

6) формирование топологии резистивного слоя РС5000 магнетронным методом и фотолитографией,

7) металлизация Cr–Cu–Cr двух сторон подложки магнетронным методом,

8) формирование фоторезистивной маски внутри отверстий и на двух сторонах подложки спреевым нанесением и фотолитографией,

9) формирование топологического рисунка на двух сторонах подложки травлением Cr–Cu–Cr и удаление фоторезиста в жидкостных травителях и в растворителе,

10) удаление Cr и гальваническое осаждение Cu–Au в жидкостных травителях и в гальванической ванне,

11) резка на модули, монтаж и испытания.

По предложенной технологии изготовлены и исследованы восемь образцов поглощающего СВЧ-экрана. Размер образцов составлял $0.4 \times 10.9 \times 17.5$ мм. Общий вид топологии диэлектрической пластины поглощающего СВЧ экрана со стороны резистивной пленки, разделенной на ячейки двумерной решетки с металлизированными отверстиями и увеличенный фрагмент той же топологии представлены на рис. 8а и 8б, соответ-

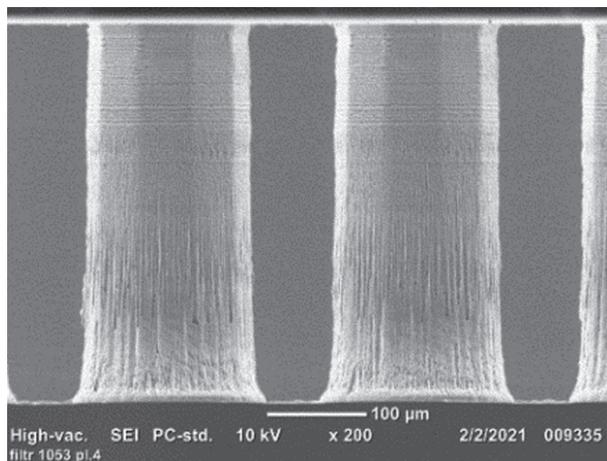


Рис. 9. Микрофотография с электронного микроскопа поперечного сечения кремниевой подложки со сформированными отверстиями.

ственно. На рис. 9 представлена микрофотография с электронного микроскопа поперечного сечения кремниевой подложки со сформированными отверстиями. Как видно из рисунка профиль отверстия представляет собой цилиндр с практически вертикальными стенками.

Методы экспериментального исследования. Образцы платы размещались на широкой стенке отрезка волновода сечением 11×5.5 мм. К волноводным входам присоединялись коаксиально-волно-

водные переходы. Измеряли ослабление, вносимое отрезком волновода с установленной платой.

Экспериментальные результаты. Частотные характеристики вносимого ослабления восьми образцов оказались близкими. На рис. 10 приведена типичная частотная характеристика образца поглощающего СВЧ-экрана. В диапазоне частот измерений 14.7...26.7 ГГц наблюдался плавный рост ослабления с ростом частоты до максимального значения 20...23 дБ на частоте около 20 ГГц, а затем плавный спад. Звездочками на рисунке обозначены расчетные значения. В целом наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных: расхождение частоты максимального ослабления составило 6.7%. Такое расхождение вызвано отличием расчетного значения удельной емкости решетки от фактического. Расчетный уровень ослабления соответствует экспериментальному.

ВЫВОДЫ

Предложен экран, поглощающий электромагнитное излучение, разработана микромашина технология на основе объемной микрообработки монокристаллического кремния, для поглощающих экранов прямоугольного сечения проведено исследование характеристик собственных типов волн, решена задача возбуждения экрана элементарным диполем, проведен расчет требуемой геометрии и изготовлены экспериментальные образцы, исследованы их характеристики. Измерено

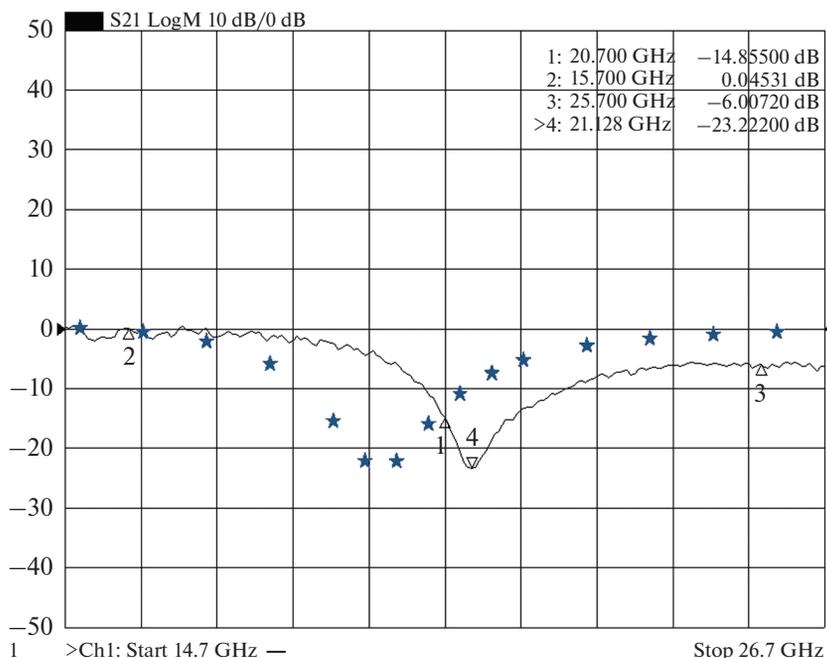


Рис. 10. Типичный скриншот частотной характеристики вносимого ослабления участком поглощающего СВЧ-экрана прямоугольного сечения длиной 17.5 мм. Сплошная линия – эксперимент, звездочки – расчет.

ослабление, вносимое участком поглощающего экрана длиной 17.5 мм. Показано, что в диапазоне частот измерений 14.7...26.7 ГГц наблюдается плавный рост ослабления с ростом частоты до максимального значения 20... 23 дБ на частоте около 20 ГГц, а затем плавный спад. При этом наблюдается хорошее соответствие теоретических расчетов и экспериментальных результатов. Изготовленные образцы поглощающего экрана обеспечивают получение значительного ослабления в требуемом частотном диапазоне при малой толщине подложки и могут быть успешно применены в аппаратуре космического назначения с целью обеспечения электромагнитной совместимости в СВЧ-трактах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ 6-00-5761783-322-891. "Пластины эластичные марок "ХВ". М.: Госстандарт, 1989. <https://ohrana-truda.ru/upload/iblock/52b/4293841952.pdf>.
2. *Рязанцев Р.О., Саломатов О.П., Поленга С.В.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 23. С. 19.
3. *Assal A., Breiss H., Benzergaet R. et al.* // Micromachines. 2020. V. 11. № 10. Article No. 930.
4. *Якухин С.Д., Жуков А.А., Алимов М.В.* Планарная СВЧ поглощающая структура и способ ее изготовления. Патент РФ № 2781764. Оpubл. Офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 29 от 17.10.2022.
5. *Буянкин А.В., Поймалин В.Э.* Устройство экранирования многослойной СВЧ-платы от электромагнитного излучения. Патент РФ № 2713650. Оpubл. Офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 4 от 06.02.2020.
6. *Взятых В.Ф.* Диэлектрические волноводы. М.: Сов. радио, 1970.
7. *Егоров Ю.В.* Частично заполненные прямоугольные волноводы. М.: Сов. радио, 1967.
8. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
9. *Уолтер К.* Антенны бегущей волны. М.: Энергия, 1970.
10. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983.
11. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах, М.: Изд-во АН СССР, 1957.